

УДК 537.525
EDN: AVUEGS

PACS: 52.80.Mg

**Высотные эльфы, зарегистрированные на международной космической станции, и границы литосферных плит Земли***Л. М. Василяк, Е. В. Шубралова*

Выполнен анализ мест нахождения координат высотных кольцевых свечений (эльфов), зарегистрированных на международной космической станции в рамках международной программы «УФ-атмосфера» в 2019–2022 гг. Большинство эльфов зарегистрированы в экваториальной области Земли, что может быть следствием орбиты МКС, а также наличием большого количества гроз в этих областях. Анализ показал, что координаты зарегистрированных 37 эльфов в большей части расположены вдоль границ тектонических плит Земли.

Ключевые слова: высотные молнии, эльфы, международная космическая станция, МКС, литосферные плиты Земли.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-2-13-17

Введение

На больших высотах 40–90 км происходят кратковременные распространяющиеся светящиеся явления (Transient Luminous Events (TLEs)), которые включает в себя спрайты и эльфы [1, 2]. Вскоре после того, как были сделаны первые наземные видеозаписи спрайтов, наблюдения на борту космического челнока показали, что спрайты и эльфы встречаются по всему миру [2]. Впоследствии спрайты и эльфы были обнаружены с других космических платформ, таких как Международная космическая станция [3–8].

Спрайты (аббревиатура от Stratospheric / mesospheric perturbations resulting from intense thunderstorm electrification), по-видимому, являются наиболее часто наблюдаемыми из всех TLE (кратковременных световых явлений) в мезосфере. Штормы могут породить от 400 до 750 спрайтов в течение 4–5 часов [2]. Инициация спрайта, по-видимому, чаще всего происходит на высоте от 70 до 75 км с высокоструктурированными ветвящимися серпантинами, часто распространяющимися вниз, за которыми следует увеличение яркости вверх с более слабым свечением верхней части спрайта. Нижняя часть спрайта имеет характерный синий цвет.

Эльфы (ELVEs, аббревиатура от «emission of light for very low frequency perturbation from an electromagnetic pulse source», т. е. «излучение света при низкочастотном возмущении от источника электромагнитных импульсов») красного цвета – это быстро расширяющийся диск, который генерируется в плазме ионосферы импульсным электрическим полем, которое образуется при стекании электрического заряда грозового облака при разряде молнии от облака к поверхности Земли. Эльфы образуются на высотах 80–100 км, диаметр расширяющегося диска может дости-

Василяк Леонид Михайлович¹, гл.н.с., д.ф.-м.н.
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Шубралова Елена Владимировна², гл. специалист.

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

² АО Центральный научно-исследовательский институт машиностроения.

Россия, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, 4.

Статья поступила в редакцию 13.03.2024

После доработки 25.03.2024

Принята к публикации 29.03.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

© Василяк Л. М., Шубралова Е. В., 2024

гать 400 км. Красный цвет elves может соответствовать излучению первой положительной системы молекулы азота. В УФ-области спектра (вторая положительная система молекул азота) мощность излучения в 20–30 раз больше, поэтому регистрация эльфов на МКС в рамках международной программы «УФ-атмосфера» производится в УФ области спектра (290–430 нм) [3–9]. Длительность развития эльфов не превышает 1 мс, поэтому, измерения аппаратуры «УФ-атмосфера» в режиме с временным разрешением 2,5 мкс оптимальны для регистрации и исследования пространственно-временной структуры эльфов с помощью специально созданного телескопа и программного обеспечения [3, 9].

Цель настоящей работы – проанализировать расположение координат эльфов, зарегистрированных МКС. Такой интерес связан с двумя факторами, условия возникновения сильного электрического поля при разряде молнии пока не установлены, а также сопоставить места возникновения эльфов с особенностями строения земной коры.

Регистрация эльфов и их расположение

В период с ноября 2019 по октябрь 2022 года в данных «УФ-атмосфера» было обнаружено 37 событий типа ELVEs. Обнаружено, что из 37 обнаруженных эльфов 54 % являются

однокольцевыми, 32 % – двухкольцевыми, оставшаяся часть имеет три или более колец [3, 7]. Физический механизм возникновения многокольцевых структур пока достоверно не установлен. Координаты обнаруженных эльфов, в основном, находятся в экваториальной области, как и в других исследованиях [10]. Однако, такое расположение может быть просто следствием орбиты МКС, охватываемым широтным диапазоном Земли.

На рисунке 1 указаны координаты 37 обнаруженных эльфов (точки с номером). Видно, что они в основном находятся на границах литосферных плит Земли. Следует отметить, что небольшая часть эльфов зарегистрирована в областях, удаленных от этих границ. Естественно, предположить, что на границах действуют определенные факторы, такие как вулканы, большое количество гроз, аномальные тепловыделения, которые могут проявляться и в других областях Земли. Например, три события под номерами 6, 7 и 8 (рис. 1) зарегистрированы над территорией Восточной Бразилии с интервалом 18 и 5 секунд, второе от первого и третье от второго, соответственно. Эти три места регистрации свечения, видимо, не имеют отношения к процессам движения литосферных плит, но расположены на границе Южно-американской магнитной или Бразильской магнитной аномалии, где часто происходят грозы.

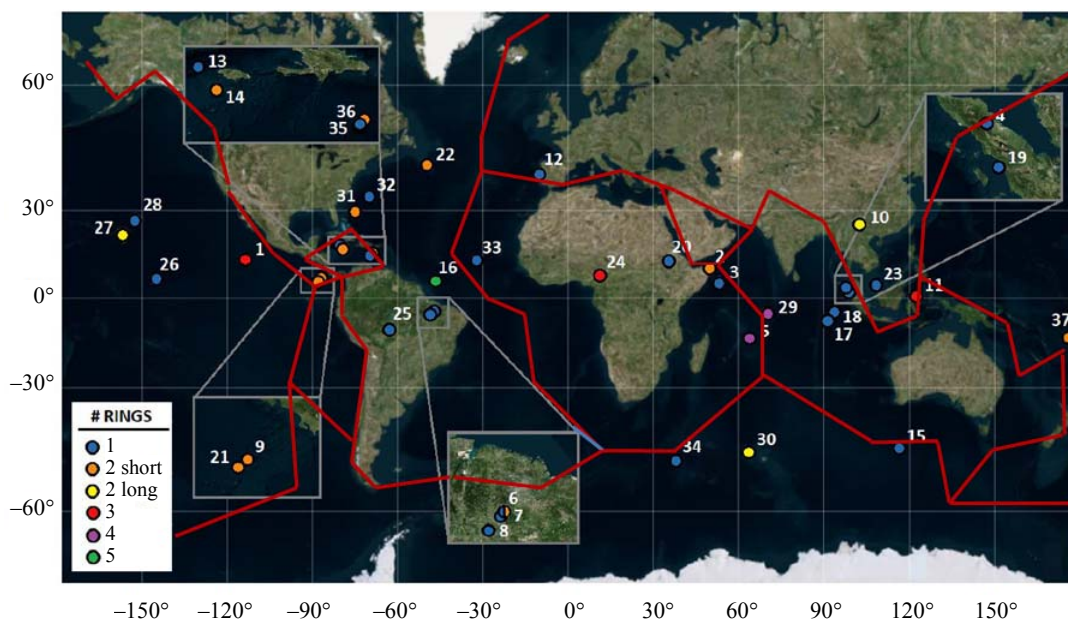


Рис. 1. Карта: координаты зарегистрированных эльфов указаны точками с номером (37 шт.), границы литосферных плит (спрединг – красные линии). На врезках показаны 4 области в увеличенном масштабе

В зоне события 29, зарегистрированного аппаратурой свечение над морской поверхностью диаметром 30 км юго-западнее острова Шри-Ланка, нет действующих вулканов. Это район Лаккадивского моря, которое очень теплое и глубокое (4 км), т. к. это рифтовая зона, ограниченная Мальдивским хребтом. Особенностью этого места является проявления явления спрединга – расхождения континентальных плит. В ходе спрединга импульс растяжения плит сопровождается поступлением новой порции мантийных расплавов, которые, остывая, наращивают края расходящихся от оси плит, в результате образуются хребты и рифтовые теплые зоны. В рифтовых глубоководных зонах на дне океана возникают «черные курильщики» и гидротермальные зоны. Трубы «черных курильщиков» возвышаются над уровнем дна на 5–100 м с температурой внутри до 300–400 °С и давлением до 100 атмосфер, постройки обогащены различными минералами и метаном. Гидротермальные зоны могут образовываться также в результате субдукции, когда океанические плиты «подныривают» под континентальные плиты. В пограничных зонах возникают глубоководные желобы и гидротермальные зоны, на континентальных плитах цепи вулканов, например, «Тихоокеанское огненное кольцо». На поверхности Земли изучены и описано большое количество гидротермальные зон.

Самые известные из них расположены на участке срединно-океанического хребта в северной части Атлантического океана, где имеются разломы и трещины в океанической коре. Сквозь них морская вода просачивается вглубь Земли, где затем нагревается магмой и вступает в химическую реакцию с горными породами. После этого разогретая и обогащенная различными веществами магма вырывается к поверхности дна. Время жизни черного курильщика зависит от того, как скоро засорится трещина, из которой поступает его «дым», и может достигать сотни лет. Грозная активность развиваются в тех местах, где холодный фронт проходит над разогретой поверхностью.

На рисунке 2 приведена карта Земли с нанесенными координатами зарегистрированных эльфов (точки с номерами регистрации), указанием вулканов (обозначены белыми звездами с красной звездочкой в центре) и «черных курильщиков» (голубые звезды). Хорошо видно, что часть зарегистрированных эльфов находится вблизи действующих вулканов, например, эльфы 20 и 24 в Африке, или в районах с «черными курильщиками». Во всех этих случаях, зарегистрированные эльфы находятся над областями поверхности Земли с аномалиями, такими как, спрединги, разломы, вулканы, аномальное тепловыделение, магнитная аномалия, а также, возможно, и другими.

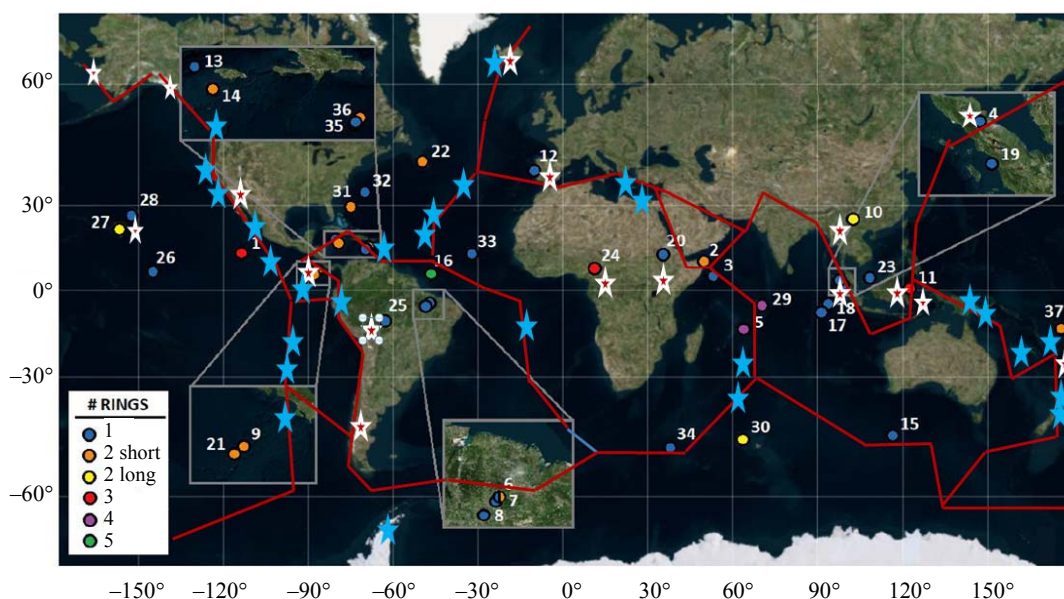


Рис. 2. Карта: координаты обнаруженных эльфов указаны точками с номером (37 шт.), границы литосферных плит (спрединг – красные линии), черные курильщики (голубые звезды), вулканы (белые звездочки с красной в центре). На врезках показаны 4 области в увеличенном масштабе

Следовательно, мониторинговые измерения высотных эльфов могут быть способом, позволяющим находить и фиксировать аномальные зоны Земли, установить связь с геофизическими процессами, осуществлять мониторинг «горячего дыхания» Земли, следить за динамикой разных процессов, образованием теплых зон. Например, подтвердить связь грозовой активности с периодами развития тайфунов и вулканических извержений в зоне Тихоокеанского огненного кольца. Несомненно, еще одним интересным вопросом является связь джетов и спрайтов, связывающих стратосферу и ионосферу, на «гребне» которых возможна быстрая инжекция аэродисперсных частиц в ионосферу с восходящей ветвью глобальной электрической цепи и смена фазового состояния «аэрозоль-космозоль». Это может обосновать массоперенос дисперсного материала вулканических газов на высоту орбиты МКС, на поверхности которой в составе мелкодисперсного осадка выявлены следы элементов, входящих в состав вулканических газов вулкана Кудрявый зоны Тихоокеанского огненного кольца.

Заключение

Координаты зарегистрированных на МКС 37 высотных эльфов в основном расположены в экваториальной области и вблизи границ тектонических плит Земли. Регистрация эльфов в экваториальной зоне с высокой степенью вероятности связана с локализацией орбиты МКС, проходящей через эту область, и наличием большого количества тайфунов и грозовых облаков и разрядов молний. Локализация зарегистрированных эльфов к тектоническим границам и спредингам может быть

связана с повышенным тепловыделением в этих областях, наличием вулканов и «черных курильщиков» на дне океанов. Эти факторы способствуют зарождению тайфунов, штормов и грозовых явлений. Поскольку механизм возникновения эльфов пока не ясен, то на тектонических границах могут быть и другие факторы, инициирующие эльфы. Таким образом, регистрация высотных эльфов космическими аппаратами может быть методом обнаружения аномальных зон Земли или зарождения тайфунов в уже известных зонах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pasko V. P., Yair Y., Kuo C.-L. / Space Sci Rev. 2012. Vol. 168. P. 475–516. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9813-9>
2. Füllekrug M., Mareev E. A., Rycroft M. J. Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges. editors, Proceeding of the NATO Advance Institute Study, Corte, Corsica, France, 24–31 July, 2004. – The Netherlands. Springer, 2004.
3. Romoli G. et al. / arXiv preprint arXiv:2310.02617. 2023.
4. Casolino M., Barghini D., Battisti M. et al. / Remote Sensing of Environment. 2023. Vol. 284. P. 113336.
5. Bacholle S., Barrillon P., Battisti M. et al. / Astrophysical Journal, Supplement Series. 2021. Vol. 253. № 2. P. 36. doi: 10.3847/1538-4365/abd93d
6. Marcelli L. et al. / Proceedings of Science. 2021. 395:367.
7. Romoli G., for the JEM-EUS Collaboration / Proceedings of 38th International Cosmic Ray Conference – PoS(ICRC2023). 2023. 444, 223.
8. Piotrowski L. W., for the JEM-EUSO Collaboration / Proceedings of 38th International Cosmic Ray Conference – PoS(ICRC2023). 2023. 444, 333.
9. Klimov P. A. / Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85. № 4. P. 389. doi: 10.3103/S1062873821040171
10. Chen A. B., Kuo C.-L., Lee Y.-J. et al. / Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2008. Vol. 113. P. A08306. doi: <https://doi.org/10.1029/2008JA013101>

High-altitude ELVEs registered on the International Space Station and boundaries of the Earth's lithospheric plates

L. M. Vasilyak¹ and E. V. Shubralova²

¹ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

² Joint Stock Company «Central Research Institute for Machine Building»
4, Pionerskaya st., Korolev, Moscow Region, 141070, Russia

Received 13.03.2024; revised 25.03.2024; accepted 29.03.2024

The analysis of the locations of coordinates of high-altitude ring lights (elves) registered on the international space station within the framework of the international program "UV atmosphere" in 2019–2022 has been performed. Most elves are registered in the equatorial region of the Earth, which may be a consequence of the ISS orbit passing through the equator, as well as the presence of a large number of thunderstorms in these areas. The analysis showed that the coordinates of the registered 37 elves are mostly located along the boundaries of the Earth's tectonic plates.

Keywords: high-altitude lightning, elves, international space Station, ISS, Earth's lithospheric plates.

REFERENCES

1. Pasko V. P., Yair Y. and Kuo C.-L., *Space Sci Rev.* **168**, 475–516 (2012).
<https://doi.org/10.1007/s11214-011-9813-9>
2. Füllekrug M., Mareev E. A. and Rycroft M. J. Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges. editors, *Proceeding of the NATO Advance Institute Study, Corte, Corsica, France, 24–31 July, 2004*, (The Netherlands. Springer, 2004).
3. Romoli G. et al., arXiv preprint arXiv:2310.02617. 2023.
4. Casolino M., Barghini D., Battisti M. et al., *Remote Sensing of Environment* **284** 113336 (2023).
5. Bacholle S., Barrillon P., Battisti M. et al., *Astrophysical Journal, Supplement Series.* **253** (2), 36 (2021).
doi: 10.3847/1538-4365/abd93d
6. Marcelli L. et al., *Proceedings of Science* 395:367 (2021).
7. Romoli G., for the JEM-EUS Collaboration., *Proceedings of 38th International Cosmic Ray Conference – PoS(ICRC2023)* 444, 223 (2023).
8. Piotrowski L. W., for the JEM-EUSO Collaboration., *Proceedings of 38th International Cosmic Ray Conference – PoS(ICRC2023)* 444, 333 (2023).
9. Klimov P. A., *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **85** (4), 389 (2021).
doi: 10.3103/S1062873821040171
10. Chen A. B., Kuo C.-L., Lee Y.-J., et al., *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **113**, A08306 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1029/2008JA013101>